

Определение оптимальных частот наблюдений на радиотелескопе УТР-2 в режиме радиообзора небесной сферы

А.А. Коноваленко, К.П. Соколов, С.В. Степкин

*Радиоастрономический институт Национальной Академии наук Украины
310002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

Статья поступила в редакцию 21 августа 1997 г.

Рассмотрена автоматизированная система, позволяющая производить прямые измерения распределений интенсивности слабых помеховых сигналов в рабочих диапазонах (10,0; 12,6; 14,7; 16,7; 20,0 и 25 МГц) радиотелескопа УТР-2. Анализ полученных с помощью этой системы экспериментальных данных позволил определить значения оптимальных частот наблюдений, не подверженных действию помеховых сигналов, и их зависимость от сезона наблюдений. Использование оптимальных частот при проведении наблюдений в режиме радиообзора небесной сферы позволяет существенно увеличить объем получаемой радиоастрономической информации.

Розглянуто автоматизовану систему для прямих вимірювань розподілу інтенсивності слабких завадових сигналів у робочих діапазонах (10,0; 12,6; 14,7; 16,7; 20,0, та 25 МГц) радіотелескопу УТР-2. Аналіз даних, що були отримані за допомогою описаного пристрою, дав можливість визначити оптимальні для кожного робочого діапазону частоти спостережень та їх залежність від сезону. Використання оптимальних частот під час проведення експериментів у режимі обзору небесної сфери дає можливість значно збільшити обсяг отримуваної радіоастрономічної інформації.

Введение

Как известно, радиоастрономические исследования в декаметровом диапазоне длин волн, т.е. на частотах $f \leq 30$ МГц, связаны со значительными экспериментальными трудностями, которые в основном определяются:

- высоким уровнем галактического фона (T_b 10 ≈ 180000 К на частоте 10 МГц) [1,2];
- влиянием земной ионосферы (рефракция, фокусировки, дефокусировки);
- геомагнитной обстановкой (магнитные бури, солнечная активность) [3];
- высокой насыщенностью диапазона помеховыми сигналами искусственного происхождения (вещательных станций, промышленных помех, т.е. сигналов, обусловленных человеческой деятельностью).

При этом влияние на качество радиоастрономических наблюдений таких факторов как высокая температура галактического фона и ионосферные эффекты хорошо известно и может быть в значительной мере ослаблено (или по крайней мере учтено) при проектировании радиоастрономических инструментов и разработке методик наблюдений. Напротив, распределение интенсивности слабых помеховых сигналов в декаметровом диапазоне неизвестно (здесь и далее под слабыми помеховыми сигналами будем понимать такие сигналы, которые вызывают незначитель-

ное, но уже заметное ухудшение качества радиоастрономических наблюдений).

С другой стороны, насыщенность декаметрового и более высокочастотных диапазонов сигналами искусственного происхождения постоянно возрастает и в перспективе именно это обстоятельство представляет собой основную угрозу для наземной радиоастрономии. В связи с этим в современной радиоастрономии проблема исследования распределения интенсивности помеховых сигналов и определения конкретных значений частот, на которых могут производиться наблюдения, не подверженные действию помех, является весьма актуальной. Рассмотрим решение этой проблемы применительно к радиотелескопу декаметрового диапазона УТР-2 [4], работающему в режиме систематического обзора небесной сферы на ряде самых низких из применяемых в современной радиоастрономии частот в диапазонах 10,0; 12,6; 14,7; 16,7; 20,0 и 25,0 МГц [5].

Можно предположить, что в декаметровом диапазоне помеховые сигналы распределены неравномерно и, возможно, существуют частоты, практически полностью свободные от помеховых сигналов в течение всего сеанса наблюдений в режиме радиообзора (т.е. приблизительно с 20 - 21 до 7 часов местного времени). Назовем эти частоты оптимальными. Однако для определения значений этих частот требуется экспериментальные исследования распределений интенсивности слабых помеховых сигналов внутри рабочих диапа-

зонов УТР-2 в зависимости от частоты f , местного времени t и сезона наблюдений (осень, зима, весна) с чувствительностью, соответствующей реальным радиоастрономическим наблюдениям. При отсутствии априорной информации о распределении помеховых сигналов выбор конкретных частот наблюдений носит случайный и необъективный характер, что часто вследствие действия помеховых сигналов приводит к практически полной потере полезной радиоастрономической информации.

Целью настоящей работы является анализ распределений интенсивности слабых помеховых сигналов внутри основных рабочих диапазонов УТР-2 (10,0; 12,6; 14,7; 6,7; 20,0 и 25,0 МГц) с целью определения так называемых “окон прозрачности” внутри этих диапазонов, характерных для различных сезонов, и значений оптимальных частот наблюдений в режиме радиообзора УТР-2. Необходимые для решения этой методологической задачи экспериментальные данные были получены в ходе осуществляемой с помощью радиотелескопа УТР-2 специальной наблюдательной программы по систематическому мониторингу уровней помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов инструмента.

Как известно, при создании радиотелескопа УТР-2 были определены 6 рабочих диапазонов инструмента с центрами на частотах 10,0; 12,6; 14,7; 16,7; 20,0 и 25,0 МГц и шириной полосы пропускания ΔF около 500 кГц каждый [4]. С тех пор внутри этих диапазонов проведено огромное число радиоастрономических наблюдений, в том числе в режиме систематического низкочастотного радиообзора небесной сферы, который продолжается и в настоящее время (см. работу [5] и ссылки к ней). Однако за прошедшие 30 лет помеховая обстановка существенно ухудшилась. В начале 70-х годов предпринимались попытки анализа помеховой обстановки внутри рабочих диапазонов УТР-2, но они не увенчались заметным успехом. Одной из основных причин этого было отсутствие в то время адекватных аппаратурных средств для исследования помеховой обстановки, которые позволили бы произвести прямые измерения интенсивности слабых помеховых сигналов и их регистрацию с целью последующего статистического анализа их временного и частотного распределений. В связи с этим вплоть до недавнего времени распределение интенсивности слабых помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 оставалось неизвестным и отстройка от помех в режиме радиообзора производилась “вслепую”, т.е. не существовало некоторого априорно известного стандарта распределений помех внутри каждого диапазона, который позволял бы производить поиск частот, свободных от помех, внутри достаточно узких, $\sum_i \Delta f_i \ll \Delta F$,

ранее определенных “окон прозрачности”. Кроме того, сам процесс отстройки от помех производился на слух и носил очень субъективный характер. В связи с этим необходимо специально отметить, что, вообще говоря, сама задача отстройки от помеховых сигналов на 30 приемных каналах инструмента в течении 10-11 часов наблюдений силами производящего наблюдения оператора является некорректной. Такая задача, безусловно, должна решаться с помощью автоматизированной системы.

Однако вплоть до недавнего времени в качестве основного приемного устройства УТР-2 использовался радиоприемник Р-250М2, который допускал только ручную механическую перестройку частоты. В связи с этим не возникала сама постановка вопроса о создании автоматизированной системы управления радиоприемным комплексом УТР-2. В последние несколько лет в качестве основного приемного устройства УТР-2 используется приемник Р-399А, позволяющий осуществлять перестройку частоты в диапазоне 1 - 32 МГц с любым шагом Δf (от 1 Гц до 31 МГц) под воздействием внешнего 32-разрядного параллельного кода. В связи с этим появилась принципиальная возможность при проведении наблюдений на радиотелескопе УТР-2 осуществлять управление приемниками (и в перспективе производить отстройку от помех) с помощью автоматизированной системы, работающей по специальному алгоритму, учитывающему реальную помеховую обстановку на момент наблюдений.

Для создания автоматизированной системы отстройки от помех необходим регистратор помеховых сигналов, т.е. устройство, которое позволяет обнаруживать в некоторой полосе частот B слабые монохроматические сигналы искусственного происхождения и измерять их интенсивность. Необходимый для решения поставленной задачи регистратор помех, способный обнаруживать слабые помеховые сигналы и измерять их интенсивность, был создан на базе цифровых знаковых корреляторов, разработанных ранее для спектроскопических исследований в декаметровом диапазоне [6,7]. Применяемый для решения поставленной задачи коррелометр был разработан в стандарте КАМАК, что позволило легко включить его в действующую сейчас автоматизированную систему регистрации данных обзора УТР-2. Применяемый коррелометр, основные принципы его построения и технические характеристики подробно описаны в разделе 1 настоящей работы.

Раздел 2 работы содержит описание автоматизированной системы, используемой для получения экспериментальных данных о распределении помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 и наблюдений в режиме их систематического сканирования (мониторинга).

В разделе 3 представлена методика анализа полученных экспериментальных данных с целью определения устойчивых "окон прозрачности" внутри рабочих диапазонов УТР-2 и значений оптимальных частот наблюдений.

В разделе 4 сформулированы основные результаты работы.

1. Корреляционный обнаружитель помеховых сигналов

Проблема обнаружения монохроматических сигналов на фоне шума относится к классической задаче спектрального анализа и может решаться различными способами. Одним из наиболее эффективных является корреляционный метод, заключающийся в определении автокорреляционной функции смеси сигнала и шума с последующим Фурье анализом. Преимущества данного подхода особенно ощущаются при использовании знакового метода определения автокорреляционной функции. С одной стороны, это обеспечивает простоту цифровой аппаратуры, ее надежность и стабильность, с другой стороны, делает устройство нечувствительным к изменению полной мощности входного сигнала и к широкополосным помехам. Многолетний опыт разработки и применения подобных устройств в низкочастотной радиоастрономической спектроскопии полностью подтверждает указанные преимущества [6,7].

Для создания системы автоматической отстройки радиометров радиотелескопа УТР-2 от помех и мониторинга помеховых сигналов в декаметровом диапазоне был разработан специализированный цифровой знаковый коррелометр, выбор параметров и краткое описание которого приведены ниже.

Поскольку решение поставленной задачи не требует точного определения частоты помехового сигнала, а необходимы только регистрация факта присутствия помехи в полосе приема и оценка ее интенсивности, Фурье - анализ автокорреляционной функции не нужен. При этом используется то известное обстоятельство, что автокорреляционная функция шумового сигнала убывает с увеличением задержки, а монохроматического - нет. Таким образом, обнаружение помехи заключается в определении знаковой автокорреляционной функции для достаточно больших задержек и в оценке полученных величин по отношению к заданному порогу.

Автокорреляционная функция сигнала $x(t)$ в знаковом коррелометре определяется в соответствии с выражением :

$$R(nT) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M \text{sgn}[x(iT)] \cdot \text{sgn}[x(iT + nT)], \quad (1)$$

где T - период дискретизации, i, n - номера отсчетов исследуемого сигнала и корреляционной функции, M - число анализируемых отсчетов сигнала (объем выборки).

Из-за нелинейного преобразования исследуемого сигнала функция $R(nT)$ отличается от истинной. Однако для решаемой задачи эта разница не существенна.

В силу аддитивного взаимодействия слабого сигнала и шума в линейном тракте измеряемая автокорреляционная функция имеет вид:

$$R(nT) = R_n(nT) + R_s(nT) + R_{\beta}(nT). \quad (2)$$

Автокорреляционная функция шумового процесса с полосой β , центральной частотой ν_i , и прямоугольной формой спектра определяется как

$$R_n(nT) = \frac{\sin \pi \beta nT}{\pi \beta nT} \cos 2\pi \nu_i nT. \quad (3)$$

Для монохроматического сигнала имеем:

$$R_s(nT) = A_s \cos 2\pi \nu_s nT, \quad (4)$$

где A_s, ν_s - мощность и частота помехового сигнала.

Третье слагаемое в формуле (2) - $R_{\beta}(nT)$, представляет собой флуктуационную добавку, возникающую из-за шумового характера исследуемого сигнала. Легко показать, что она не зависит от n и что ее среднеквадратичное значение связано с временем накопления T_i и, соответ-

ственно, объемом выборки M ($M = \frac{T_i}{T}$)

соотношением:

$$R_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{M}}. \quad (5)$$

Как показывает длительный опыт радиоастрономических исследований и специальные эксперименты допустимый уровень помеховых сигналов не должен превышать значение -20 ... -25 дБ от мощности шумового сигнала с полосой B .

Отношение мощностей шумового и помехового сигналов определяется отношением значений соответствующих автокорреляционных функций при $n=0$. Таким образом, как следует из соотношений (3) и (4), устройство обнаружения помех должно выделять сигналы с мощностью превышающей порог

$$A_s^{thr} \geq 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}.$$

Согласно критерию Найквиста период дискретизации определяется исходя из условия:

$$T \leq \frac{1}{2B}.$$

Используемые радиоприемные устройства Р-399А имеют полосы B в пределах от 10 до 40 кГц (промежуточная частота $\nu_i = 215$ кГц), соответственно $T \approx 10$ мкс. Для надежного выделения помехи значение A_s^{thr} должно не менее чем в три раза превышать уровень флуктуаций (5), следовательно:

$$A_s^{thr} \geq \frac{3}{\sqrt{M}}$$

Отсюда $M \geq 10^5 \cdot 10^6$. При заданном периоде дискретизации получаем, что для обнаружения помехи время накопления должно быть примерно 10 с.

Как следует из соотношения (3) значение $R_n(nT)$ становится меньше A_s^{thr} при $n \approx 100$. Однако в силу детерминированного характера функции (3) можно ограничиться анализом автокорреляционной функции (2) при существенно меньших задержках. Кроме того, реальные амплитудно-частотные характеристики радиоприемных устройств Р-399А естественно отличаются от функции (3). Экспериментальные исследования, проведенные с помощью приборов, описанных в работах [1] и [2], показали, что достаточное для определения автокорреляционной функции значение задержки соответствует $n \approx 20$.

Из выражения (4) следует, что в силу периодического характера данной функции оценивать мощность помехи A_s с помощью одного отсчета автокорреляционной функции нельзя, так как при заданных T и n для некоторых значений частоты сигнала ν_s , $R_s(nT) = 0$ при любых значениях A_s . Анализ и моделирование на ЭВМ показали, что устойчивое обнаружение помехи с любой частотой в полосе анализа возможно при использовании не менее чем трех отсчетов функции $R_s(nT)$. При этом для более точной оценки мощности сигнала абсолютные значения всех отсчетов суммируются.

Необходимо отметить, что в данной задаче частота помехи не определяется, поэтому критерий (6) не является обязательным.

Исходя из приведенных выше требований, было разработано цифровое устройство обнаружения помех, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Устройство работает следующим образом. Входной сигнал $x(t)$ поступает на вход компаратора К, где подвергается клиппированию:

$$y(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } x(t) \geq 0; \\ 0, & \text{при } x(t) < 0; \end{cases}$$

где $y(t)$ - сигнал на выходе компаратора. Сигнал $y(t)$ поступает на вход 19-ти разрядного сдвигового регистра Рг. При поступлении тактового импульса в регистре происходит последовательный сдвиг сигнала $y(t)$, т. е. если в нулевом разряде регистра записан сигнал $y(t1)$, то в n -том разряде соответственно - сигнал $y(t1+nT)$, где T - период тактового сигнала. Выходы нулевого, шестнадцатого, семнадцатого и восемнадцатого

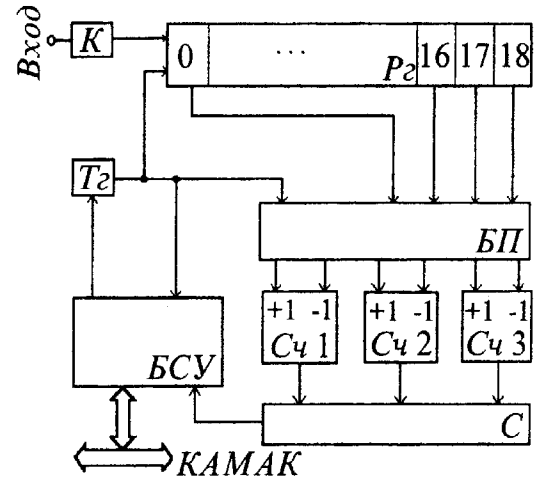


Рис. 1. Блок-схема специализированного цифрового знакового коррелометра

разрядов Рг подключены к блоку перемножения БП, в котором формируются управляющие сигналы для шестнадцатиразрядных реверсивных счетчиков Сч1 - Сч3. Если сигнал в n -том разряде равен сигналу в нулевом разряде, то в соответствующий счетчик прибавляется 1. В противоположном случае 1 из счетчика вычитается. Таким образом, в счетчиках Сч1 - Сч3 накапливаются коэффициенты знаковой автокорреляционной функции, соответствующие задержкам $16 \cdot T$, $17 \cdot T$ и $18 \cdot T$. Время интеграции задается в блоке связи и управления БСУ. Когда подсчитанное число тактовых импульсов оказывается равным заданному, тактовый генератор Тг запирается и накопление в счетчиках прекращается. Четыре старших разряда каждого счетчика при этом поступают в сумматор С, где они складываются по модулю. Полученная сумма поступает в БСУ и передается через интерфейс КАМАК в ЭВМ. Причем разрядность накопительных счетчиков выбрана таким образом, что указанному выше порогу $A_s^{thr} = 3 \cdot 10^{-3}$ соответствует значение суммы модулей отсчетов автокорреляционной функции $L=1$. Устройство линейно отображает мощность помехи вплоть до $L = 15$. Более интенсивным помехам присваивается значение $L = 15$.

2. Наблюдения

Для анализа распределения интенсивности радиосигналов внутри некоторого диапазона частот ΔF последовательным методом, необходимо систематическое сканирование этого диапазона с некоторым достаточным для решения поставленной задачи периодом ΔT и частотным разрешением Δf . Соответственно, измерения распределений интенсивностей слабых помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 осуществлялись методом частотного сканирования рабочих диапазонов с помощью автоматизированной системы, упрощенная блок-схема которой представлена на рис. 2.

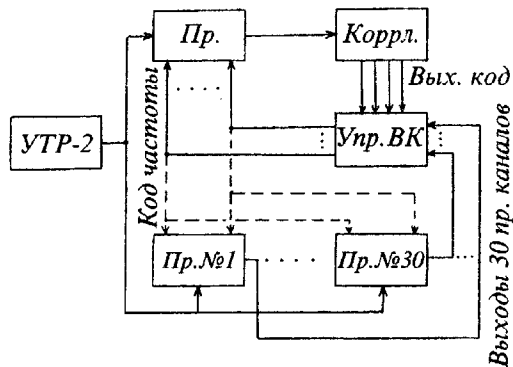


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки регистрации помеховых сигналов в рабочих диапазонах радиотелескопа УТР-2

Основными функциональными элементами автоматизированной системы являются: приемник Пр с полосой пропускания $B = 10$ кГц, коррелометр Коррл и управляющий вычислительный комплекс Упр.ВК. Приемник перестраивается по частоте под воздействием кода частоты, поступающего от управляющего комплекса (пунктиром на рис. 2 показано, что в настоящее время имеется техническая возможность производить независимое управление частотой всех 30 приемных устройств инструмента). На каждой установленной частоте сигнал с выхода приемника поступает на вход коррелятора, где анализируется с целью обнаружения монохроматического помехового сигнала. Результат анализа выдается в управляющий комплекс в виде 4-разрядного двоичного кода. После получения кода преобразования от коррелометра управляющий комплекс выдает на приемник новое значение частоты и весь процесс повторяется. Очевидно, что в данной системе темп перестройки приемника по частоте определяется собственным временем преобразования коррелометра. В применяемом коррелометре уровень "0" выбран таким образом, что при наблюдениях в режиме радиообзора с усилением 30 дБ влияние помех никак себя не проявляет, т.е. можно счи-

тать, что при "0"-вом коде на выходе коррелятора помеховый сигнал на данной частоте полностью отсутствует. При выбранном уровне "0" собственное время преобразования коррелометра составляет ≈ 12 секунд.

Сканирование помеховых сигналов осуществлялось в диапазонах 10,0; 12,6; 14,7; 16,7; 20 и 25 МГц в полосе ± 200 кГц (т.е. в каждом диапазоне сканировалась полоса частот $\Delta F = 400$ кГц). Шаг перестройки по частоте Δf в процессе сканирования диапазонов был выбран равным полосе пропускания B приемника, т.е. $\Delta f = 10$ кГц. Таким образом, внутри каждого диапазона измерения интенсивности помеховых сигналов осуществлялись на 40 фиксированных частотах, т.е. за один проход каждого диапазона получалось 40 отсчетов интенсивности помеховых сигналов, отстоящих друг от друга на 10 кГц по частоте и на 12 с по времени. В результате просмотр всего диапазона с полосой 400 кГц осуществлялся за 8 мин, т.е. дискретизация по времени каждой фиксированной частоты диапазона осуществлялась с периодом $\Delta T = 8$ мин. Можно показать, что в рамках сформулированной выше задачи это вполне достаточный интервал для регистрации изменений помеховой обстановки.

Систематический мониторинг рабочих диапазонов УТР-2 был начат 2 года назад и осуществлялся одновременно с реальными наблюдениями в режиме радиообзора небесной сферы в интервале склонений $30^\circ \leq \delta \leq 40^\circ$. При этом на вход приемника, осуществляющего сканирование, от антенн УТР-2 подавался тот же сигнал, что и на входы радиометров. Таким образом, в ходе эксперимента одновременно регистрировались два различных потока данных: один поток представлял собой данные с выходов 30-канальной приемной аппаратуры, получаемые в режиме радиообзора небесной сферы, и второй - измеряемые с помощью рассмотренной выше системы значения интенсивности помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 (см. рис. 2).

Заданное быстродействие коррелометра (12 с) позволяло осуществлять за один сеанс наблюдений в режиме радиообзора сканирование только одного диапазона инструмента. В связи с этим для получения информации о распределении помеховых сигналов внутри всех рабочих диапазонов УТР-2 применялись различные методики наблюдений от простого последовательного чередования диапазонов (одна ночь - один диапазон), до мониторинга каждого выбранного диапазона в течении нескольких последовательных сеансов наблюдений (ночей) с целью определения изменений в распределении помеховых сигналов от ночи к ночи. Всего за 2 года наблюдений, в периоды с октября по май, было получено около 260 записей в режиме сканирования. Наибольшее число

записей получено в диапазонах 10; 12,6; 14,7 и 16,7 МГц и минимальное (1-2 записи в месяц) в диапазонах 20 и 25 МГц.

В каждом сеансе наблюдений, т.е. за время приблизительно 10-11 часов (от 20^h - 21^h до 7^h местного времени) получалось около 80 сканов выбранного диапазона. Таким образом, получаемые в ходе каждого сеанса наблюдений отсчеты интенсивности помеховых сигналов принадлежат трехмерному пространству, в котором осями являются частота f , интенсивность помеховых сигналов L и местное время t . Отсюда, экспериментальные данные позволяют исследовать:

1. Распределения интенсивности помеховых сигналов по частоте в полосе $\Delta F = 400$ кГц с разрешением $\Delta f = 10$ кГц.

2. Изменения этих распределений в зависимости от местного времени t на протяжении 10-11 часов с временным разрешением $\Delta T = 8$ мин. С другой стороны, учитывая, что для каждого частотного диапазона имеются записи помеховой обстановки, сделанные как в последовательных сеансах наблюдений, так и в разные сезоны, полученные экспериментальные данные позволяют исследовать изменения в распределениях помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 на трех основных временных масштабах:

1) в зависимости от местного времени в течение одного сеанса наблюдений,

2) в течении нескольких (до 4) последовательных сеансов наблюдений и

3) в зависимости от сезона наблюдений (осень, зима, весна).

Предварительный анализ действия помех разной интенсивности на качество полученных радиоастрономических данных показал, что помеховые сигналы с уровнями интенсивности $0 \leq L \leq 2$ не оказывают заметного влияния на качество радиоастрономических записей и ими можно пренебречь. Помехи с уровнями $3 \leq L \leq 4$ оказывают незначительное влияние на качество радиоастрономических записей, т.е. такие записи еще могут быть приняты к дальнейшей обработке. Помеховые сигналы с уровнями интенсивности $5 \leq L \leq 8$ могут сильно исказить запись, а помеховые сигналы с уровнями $L \geq 9$ приводят, как правило, к зашкаливанию приемного устройства.

3. Обсуждение

Для того чтобы получить общее качественное представление о распределении интенсивности помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 в зависимости от частоты и местного времени рассмотрим экспериментальные данные, характерные для центрального диапазона

16,7 МГц. На рис. 3 на плоскости частота - местное время показано распределение интенсивности помеховых сигналов внутри диапазона 16,7 МГц, типичное для октября - начала ноября 1996 г. (здесь различными градациями серого обозначены помеховые сигналы разной интенсивности: белый цвет соответствует уровням $L \leq 3$, серый - $4 \leq L \leq 8$, черный - $L \geq 9$).

На рис. 3 каждый частотный скан выделен и занимает 8 мин. Из представленной картинке легко определить характерный для этого периода временной масштаб изменений помеховой обстановки в диапазоне 16,7 МГц. Видно, что в указанный период успешные радиоастрономические наблюдения можно было проводить только в течение приблизительно 4 часов в середине ночи, т.е. при проведении радиоастрономической записи стандартным методом (без априорного знания оптимальных частот) почти 60% информации было бы потеряно. Однако из представленного распределения следует также, что имеется очень узкий интервал частот, $\Delta f \approx 10$ кГц, с центром на частоте $f_0 = 16,520$ МГц, который практически свободен от помеховых сигналов в течение всего сеанса наблюдений, т.е. при проведении наблюдений на этой оптимальной частоте выход полезной информации в указанный период может быть увеличен в 2,5 раза по сравнению со стандартной методикой. Полученные экспериментальные данные показывают, что оптимальная частота $f_0 = 16,520$ МГц является устойчивой, т.е. характеризуется самым низким во всем анализируемом диапазоне частот уровнем помех в течение продолжительного (до трех месяцев) времени. Таким образом, оптимальная частота $f_0 = 16,520$ МГц позволяет производить успешные радиоастрономические наблюдения каждую ночь в течение октября, ноября, декабря. В периоды с декабря по февраль и с марта по май распределения помеховых сигналов в диапазоне 16,7 МГц существенно отличаются от представленного на рис. 3. Более подробно этот вопрос рассмотрен ниже.

Перейдем к количественному описанию полученных экспериментальных данных. Из предварительного анализа распределений интенсивности помеховых сигналов на плоскости частота - местное время следует, что во всех рабочих диапазонах УТР-2 имеются так называемые оптимальные частоты, которые практически свободны от помех в течение всего сеанса наблюдений, т.е. на которых выполняются следующие два условия:

1) обеспечивается минимальный по всему диапазону уровень помех в течение всего сеанса наблюдений,

2) этот минимальный уровень не превосходит предельно допустимый порог помех L_0 и практически не зависит от местного времени.

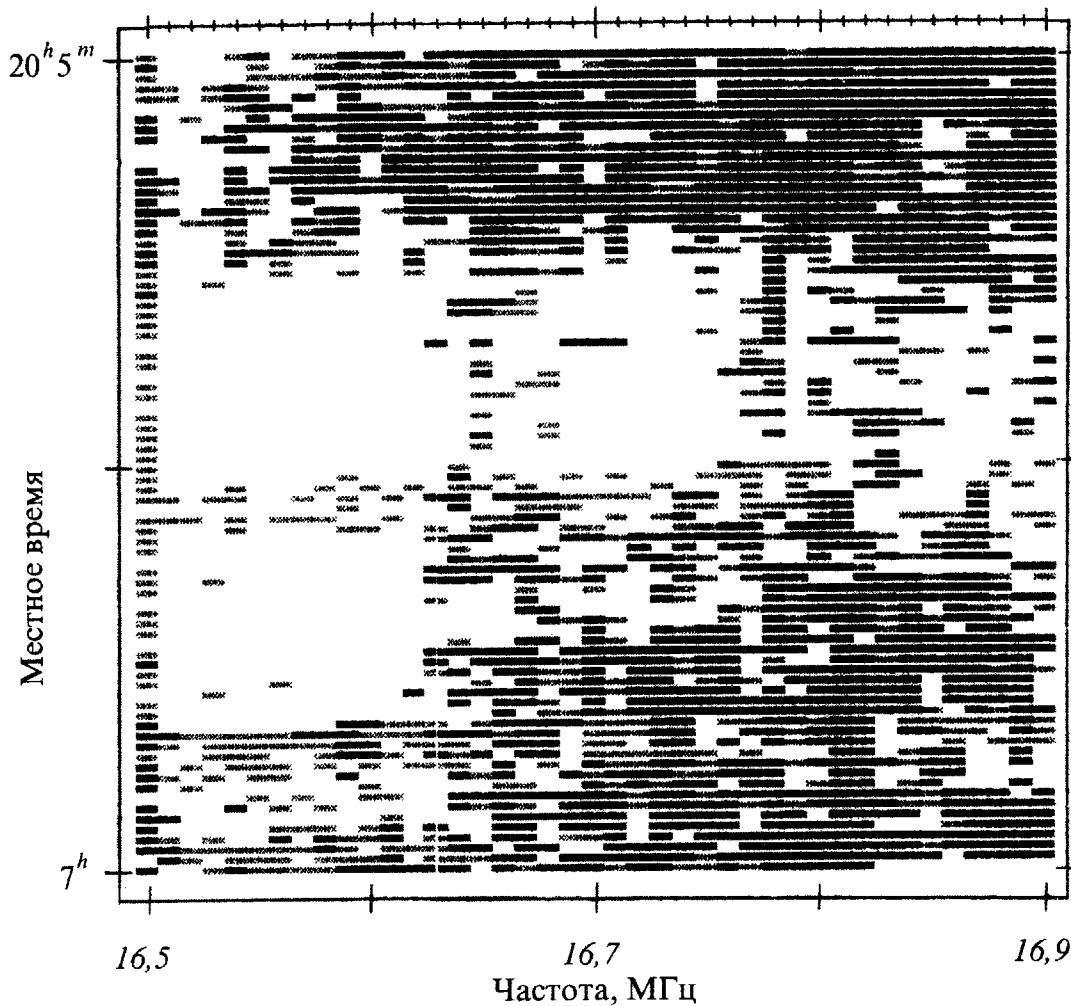


Рис. 3. Распределения интенсивности помеховых сигналов в диапазоне 16,7 МГц на плоскости частота - местное время

Следовательно, для обнаружения оптимальных частот наблюдений мы можем исключить из дальнейшего рассмотрения местное время и перейти от трехмерного к двумерному представлению полученных экспериментальных данных. С другой стороны, если в процессе проведения радиоастрономической записи появляется помеховый сигнал с уровнем, превышающим некоторый допустимый порог L_0 , $L \geq L_0$, то действительное значение этого уровня уже не важно. В связи с вышеизложенным для количественного описания распределения интенсивности помеховых сигналов и определения значений оптимальных частот введем параметр $p_f(L \geq L_0)$, характеризующий вероятность появления в течение сеанса наблюдений на некоторой частоте f помехи с уровнем $L \geq L_0$.

На рис. 4, а представлено распределение параметра $p_f(L \geq 4)$, характеризующее почти идеальные для радиоастрономических наблюдений условия в самом низкочастотном диапазоне инструмента 10 МГц (отметим, что в диапазоне 10,0 МГц

при $L_0 = 4$ радиоастрономическая запись еще пригодна к дальнейшей обработке).

На рис. 4, а в распределении параметра $p_f(L \geq 4)$ отчетливо видны три окна прозрачности в диапазоне 10 МГц с суммарной полосой $\sum_i \Delta f_i \approx 90$ кГц, внутри которых обеспечивается минимальный уровень помех. Весь остальной диапазон принципиально не пригоден для радиоастрономических наблюдений. Так, полоса частот $9,8 \leq f \leq 10,0$ МГц всегда закрыта для радиоастрономических наблюдений. Из представленного распределения видно, что в зимний период (декабрь, январь) выбор оптимальной частоты $f_0 = 10,010$ МГц позволяет получать в самом низкочастотном диапазоне УТР-2 радиоастрономические данные, пригодные к дальнейшей обработке, практически в течение всего сеанса наблюдений. Напротив, в осенне - весенний период, в следствие действия помех, диапазон 10 МГц практически

полностью закрыт для наблюдений в режиме радиообзора.

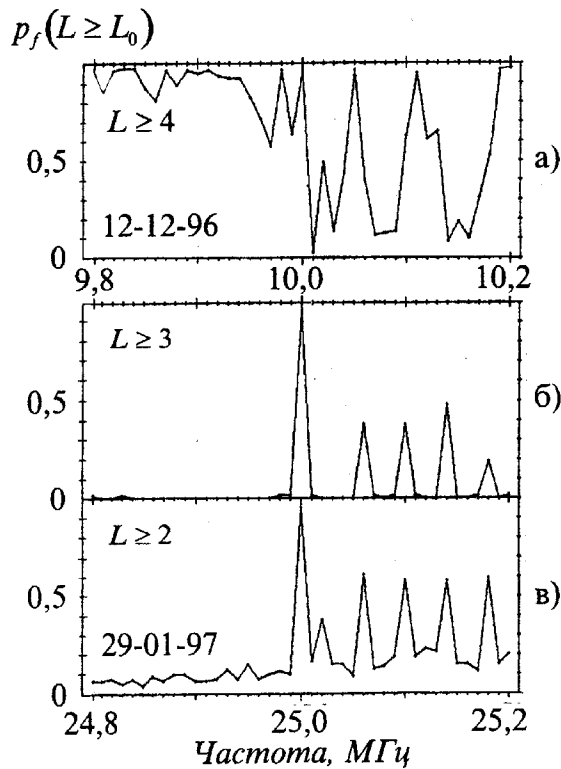


Рис. 4. Зависимости распределений вероятности возникновения помеховых сигналов разной интенсивности от частоты в диапазонах 10 и 25 МГц

На рис. 4, б показано характерное для зимнего периода наблюдений распределение параметра $p_f(L \geq L_0)$ в диапазоне 25 МГц для значения $L_0 = 3$. В представленном распределении параметра $p_f(L \geq L_0)$ отчетливо видны мощная и, наверное, относительно близкая станция на частоте $f = 25,0$ МГц и 4 слабых и, по-видимому, далеких станций (поскольку прохождение их сигналов очень нестабильно как по времени, так и по регистрируемому уровню сигнала). Из рис. 4, б также следует, что внутри диапазона 25 МГц имеются несколько широких частотных интервалов, внутри которых могут быть получены записи, не искаженные помехами. Это дает, в частности, возможность выполнять в этом диапазоне радиоастрономические наблюдения с полосой $B = 50$ кГц на частотах $f < 25,0$ МГц.

На рис. 4, в для того же сеанса наблюдений показано распределение параметра $p_f(L \geq L_0)$ для значения $L_0 = 2$. Здесь значение L_0 специально выбрано ниже предельно допустимого значения $L_0 = 3$, т.к. распределение $p_f(L \geq 2)$ позволяет определить частоты, на которых обеспечивается абсолютный минимум в распределении помех.

Из полученных экспериментальных данных следует, что распределения помеховых сигналов в диапазонах 25 и 20 МГц слабо зависят от местного времени и сезона наблюдений, изменения от ночи к ночи также незначительны. Напротив, в более низкочастотных диапазонах 10 - 16,7 МГц помеховая обстановка намного сложнее и сильно зависит как от местного времени, так и от сезона наблюдений.

На рис. 5, а, б, в, г показаны распределения параметра $p_f(L \geq L_0)$, демонстрирующие сезонную зависимость изменений помеховой обстановки в диапазоне 16,7 МГц.

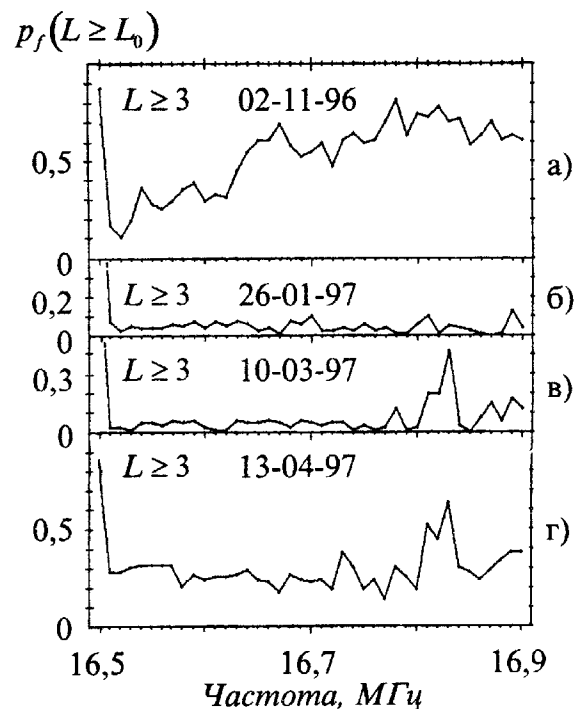


Рис. 5. Сезонная зависимость распределений вероятности возникновения помеховых сигналов с уровнями $L \geq 3$ в диапазоне 16,7 МГц

Видно, что в осенний период (рис. 5, а) на частоте $f_0 = 16,520$ МГц вероятность появления помех с уровнем, превышающим допустимый порог $L_0 = 3$, составляет $p \approx 0,1$ (т.е. помеховые сигналы проявляются только в течение периода времени, составляющего всего $\approx 10\%$ от общей длительности сеанса наблюдений). Напротив, как уже отмечалось выше и как следует из распределения параметра $p_f(L \geq 3)$, при наблюдениях на других частотах диапазона теряется в среднем около 60% полезной информации, т.е. в осенний период наблюдения на оптимальной частоте $f_0 = 16,520$ МГц обеспечивают увеличение выхода полезной радиоастрономической информации в $\approx 2,5$ раза по сравнению со стандартной методикой наблюдений.

На рис. 5, б, в показаны распределения параметра $p_f(L \geq 3)$ в диапазоне 16,7 МГц, типичные для зимнего периода. Видно, что в зимний период (декабрь, январь, февраль, начало марта) диапазон практически полностью свободен от помех, при этом наблюдения на частоте $f_0 = 16,520$ МГц, определенной для осеннего периода, по-прежнему обеспечивают максимальный выход полезной информации. Для более точного определения оптимальных частот, на которых в зимний период обеспечивается абсолютный минимум в распределении помеховых сигналов, рассмотрим соответствующие распределения $p_f(L \geq L_0)$ для значения $L_0 = 2$ (рис. 6, а, б).

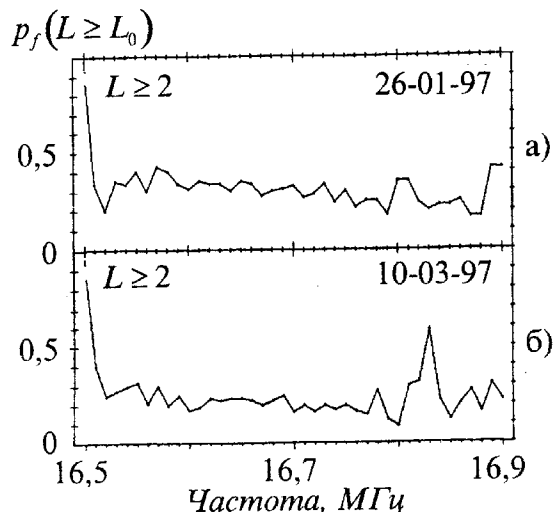


Рис. 6. Зависимость распределений вероятности возникновения помеховых сигналов с уровнями $L \geq 2$ от частоты в диапазоне 16,7 МГц для двух зимних сеансов наблюдений

Здесь значение L_0 специально выбрано ниже допустимого уровня $L_0 = 3$. Из рис. 6, а видно, что в зимний период частота $f_0 = 16,520$ МГц, определенная из осенних распределений, по-прежнему характеризуется минимальным уровнем помех. Кроме того, появились частоты 16,790 и 16,830 - 16,880 МГц, которые также обеспечивают максимальный выход полезной информации. Таким образом, в зимний период для поиска частот, на которых обеспечивается абсолютный минимум помех, следует анализировать только частоту 16,520 МГц и достаточно узкий интервал частот 16,820 - 16,880 МГц (отметим еще раз, что, вообще говоря, в зимний период допустимый уровень помех обеспечивается на любой частоте в интервале 16,520 - 16,880 МГц). Напротив, как следует из рис. 6, б, в начале марта абсолютный минимум в распределении помеховых сигналов сместился в интервал частот 16,790 - 16,800 МГц и на частоту 16,840 МГц.

На рис. 5, г показано типичное для апреля распределение параметра $p_f(L \geq 3)$ в диапазоне 16,7 МГц. Отчетливо видно значительное по сравнению с зимним периодом возрастание общего уровня помех во всем диапазоне, приводящее к тому, что в весенний период в среднем теряется около 30% полезной информации. При этом наблюдения на оптимальных частотах $f_0 = 16,770$ и $f_0 = 16,800$ МГц позволяют понизить эту потерю до $\approx 15\%$, что эквивалентно увеличению выхода полезной информации в $\approx 1,2$ раза.

Таким образом, результаты наблюдений помеховой обстановки, полученные в разных сеансах наблюдений и представленные как распределения величины $p_f(L \geq L_0)$ по частоте, легко сравнивать между собой, определять средний фоновый уровень помех, а также легко определять значения оптимальных частот, которые не подвержены действию помех.

Итак, предложенная в настоящей работе методика анализа экспериментальных данных, полученных в результате систематического мониторинга уровней помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2, позволяет определять:

1) распределения интенсивности помеховых сигналов, характерные для различных сезонов наблюдений,

2) значения оптимальных частот наблюдений, на которых обеспечивается уровень помех, ниже некоторого предельно допустимого для выполняемых наблюдений порогового значения L_0 .

Полученные результаты позволили применить новую методику наблюдений в режиме радиозвора. Так, в отличие от старой методики, когда в ходе сеанса наблюдений операторами предпринимались попытки отстройки от помех (при отсутствии априорной информации о распределении помеховых сигналов в рабочих диапазонах УТР-2), согласно новой методике, в начале каждого сеанса наблюдений на всех 30 приемных каналах устанавливаются заранее определенные для каждого рабочего диапазона УТР-2 значения оптимальных частот, которые затем не меняются в течение всего сеанса наблюдений. Необходимые изменения значений оптимальных частот производятся в соответствии с результатами анализа экспериментальных данных, полученных в ходе предыдущих сеансов наблюдений помеховой обстановки. Применение новой методики наблюдений позволило существенно увеличить выход полезной информации, получаемой в каждом сеансе наблюдений (особенно в диапазонах 12,6; 14,7; 16,7 МГц). Приближенная количественная оценка получаемого от применения новой методики наблюдений выигрыша в выходе полезной радиоастрономической информации может быть сделана на основании сравнения нескольких групп записей (по 10 - 12 записей в каждой группе), выполненных в ре-

жиге радиообзора по старой и новой методике в разные сезоны наблюдений. Такие оценки были получены для каждого сезона наблюдений. При этом для каждой i -той записи группы в каждом диапазоне ν оценивался параметр $k_{\nu} = t_{\text{пол}} / t_{\text{общее}}$, представляющий собой отношение суммарной длительности полезной записи, не подверженной действию помех, к полной (общей) длительности записи. Затем определялось среднее для каждого рассматриваемого ансамбля записей значение $\langle k_{\nu} \rangle$ в каждом диапазоне. Результирующий средний выигрыш G_{ν} в выходе полезной радиоастрономической информации за

счет применения наблюдений на оптимальных частотах оценивался как

$$G_{\nu} = \langle k_{\nu} \rangle_{\text{новая}} / \langle k_{\nu} \rangle_{\text{старая}},$$

где $\langle k_{\nu} \rangle_{\text{новая}}$ и $\langle k_{\nu} \rangle_{\text{старая}}$ - средние для рассматриваемого сезона наблюдений значения коэффициентов выхода полезной информации в диапазоне ν , полученные по новой и старой методике наблюдений соответственно.

Нижные численные оценки выигрыша в выходе полезной информации, полученные в результате применения новой методики, приведены в Таблице.

Таблица

Диапазон, МГц	12,6	14,7	16,7	20,0	25,0
G_{ν} (осень, весна)	1,46	1,37	1,30	1,05	1,03
G_{ν} (зима)	1,17	1,14	1,09	1,03	1,04

Из данных Таблицы следует, что в диапазонах 16,7; 14,7; 12,6 МГц в осенний и весенний периоды (когда насыщенность диапазона помеховыми сигналами максимальна) при проведении наблюдений на фиксированных оптимальных частотах нижние оценки среднего выигрыша в выходе полезной радиоастрономической информации составляют от 46% до 30% соответственно. Таким образом, применяя для проведения реальных радиоастрономических наблюдений заранее определенные из приведенного выше анализа оптимальные частоты удалось значительно повысить эффективность использования радиотелескопа УТР-2 в режиме радиообзора.

В диапазонах 20 и 25 МГц выигрыш в выходе полезной информации, получаемый от применения новой методики наблюдений, не существен. Это обусловлено тем, что в этих диапазонах суммарная ширина частотного окна, практически свободного от помех, составляет большую часть этих диапазонов.

Таблица не содержит данных о диапазоне 10 МГц. Это связано с тем, что условия наблюдений в этом диапазоне качественно отличаются от условий, характерных даже для ближайшего к нему диапазона 12,6 МГц. Так, период времени, в течение которого присутствует хотя бы одно из показанных на рис. 4, а окон прозрачности, ограничено декабрем-январем.

Необходимо также отметить еще одну методологическую сторону проделанной экспериментальной работы. Как уже отмечалось выше, задача отстройки от помех силами оператора является некорректной. Это обусловлено не только низкой

эффективностью этой работы, но и тем, что значение частоты наблюдений в течение сеанса наблюдений все время меняется, что, учитывая значительную неравномерность АЧХ приемного тракта по диапазону, приводит к случайному изменению уровня полезных сигналов и появлению еще одной случайной составляющей в результирующей неопределенности оценки амплитуд полезных сигналов. Так, дополнительная составляющая в неопределенности оценки амплитуд полезных сигналов, вызванная случайными изменениями частоты наблюдений (что наиболее отчетливо проявляется в разности уровней вечерней и утренней калибровок) может достигать 15 - 20%. Наблюдения на фиксированной оптимальной частоте полностью снимают эту дополнительную неопределенность в оценке уровней полезных сигналов.

Выводы

Итак, основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Создана автоматизированная система регистрации уровней помеховых сигналов и разработана методика анализа экспериментальных данных, позволяющая исследовать распределения интенсивности помеховых сигналов как внутри всего рабочего диапазона УТР-2 (8 - 32 МГц), так и более узких частотных диапазонов, выбранных для проведения наблюдений.
2. Экспериментальные данные, полученные с помощью этой системы в ходе систематического мониторинга помеховой обстановки внутри ос-

новых рабочих диапазонов УТР-2 10,0; 12,6; 14,7; 16,7; 20 и 25,0 МГц позволили определить так называемые "окна прозрачности" внутри этих диапазонов, свободные от помех, и значения оптимальных частот наблюдений в режиме радиообзора УТР-2, характерных для каждого сезона наблюдений.

3. Проведение реальных наблюдений в режиме радиообзора с использованием определенных ранее значений оптимальных частот позволило значительно повысить эффективность использования радиотелескопа УТР-2 при наблюдениях в диапазонах 10; 12,6; 14,7 и 16,7 МГц, а также уменьшить статистическую неопределенность в оценках амплитуд полезных сигналов.

4. Экспериментально полученные данные позволяют разработать алгоритм полностью автоматизированного определения значений оптимальных частот наблюдений (и при необходимости алгоритм автоматизированной отстройки от помех) непосредственно в ходе радиоастрономических экспериментов.

5. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что распределение помеховых сигналов внутри рабочих диапазонов УТР-2 практически не зависит от ориентации диаграммы направленности инструмента в пределах $\pm 30^\circ$ от зенитного положения.

6. Показано, что с помощью рассмотренной выше автоматизированной системы можно осуществлять поиск оптимальных частот (и их автоматическую установку) во всех 6 рабочих диапазонах УТР-2 одновременно, т.к. суммарная полоса (по всем диапазонам) частот, в которых имеет смысл производить поиск оптимальных частот не превышает приблизительно 200 кГц.

Очевидно, что полученный экспериментальный материал позволяет также исследовать изменения состояния ионосферы как в течение одного сеанса наблюдений, так и в зависимости от времени года. В данной работе круг рассматриваемых вопросов специально ограничен решением методологической задачи создания аппаратурно-программного комплекса регистрации слабых помеховых сигналов и разработкой методики анализа их распределений в рабочих диапазонах радиотелескопа

УТР-2 с целью повышения эффективности использования инструмента при проведении радиоастрономических наблюдений.

Литература

1. A.H. Bridle. Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1967, 136, No. 2, p. 219-240.
2. J.L. Caswell. Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1976, 177, No. 3, p. 601-616.
3. Г.С. Иванов-Холодный, А.В. Михайлов. Прогнозирование состояния ионосферы. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1980, 190 с.
4. S.Ya. Braude, A.V. Megn, V.P. Ryabov, N.K. Sharykin and I.N. Zhouck. Astrophysics and Space Science. 1978, 54, No. 1, p. 3-36.
5. S.Ya. Braude, K.P. Sokolov and S.M. Zakharenko. Astrophysics and Space Science. 1994, 213, No.1, p.1-62.
6. А.А. Коноваленко. Приборы и техника экспериментов. 1981, 6, с.123-126.
7. С.В. Степкин. Радиофизика и радиоастрономия. 1996, 1, №2, с. 255-258.

Determination of the Optimum Operating Frequencies for Observations with the UTR-2 Radio Telescope in the Sky Surveying Mode

A.A. Konovalenko, K.P. Sokolov, S.V. Stepkin

The automated system that allows to make direct measurements of the intensity distributions of weak interference signals within the main operating frequency bands (10.0, 12.6, 14.7, 16.7, 20.0 and 25 MHz) of the UTR-2 radio telescope is considered. Analysis of the obtained data has allowed to determine the values of the optimum observation frequencies which are not affected by interferences, as well as their dependence from observational seasons. Utilization of the optimum frequencies for carrying out of the observations with the UTR-2 in the radio sky survey mode provides sufficient improvement of the radio astronomical data output.